



Emisja gazów cieplarnianych w sektorze motoryzacji z zastosowaniem oceny cyklu życia

M. Mrozek^a, A. Grajcar^b

^a Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Inżynierii Materiałów Konstrukcyjnych i Specjalnych
email: lena.mrozek@gmail.com; adam.grajcar@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przeanalizowano wpływ zmniejszenia masy pojazdu na emisję gazów cieplarnianych wykorzystując w tym celu trzy różne materiały zastosowane na szkielet nadwozia. Obliczając emisję gazów cieplarnianych dokonano analizy całego cyklu życia pojazdu i jego wpływu na środowisko.

Abstract: This paper presents the impact of reduced weight of vehicles on the emission of greenhouse gases. Three different materials used for the construction of the vehicle's body were examined for this purpose. The analysis of the entire life cycle of vehicles and its impact on the environment was carried out in order to calculate the emission of greenhouse gases.

Słowa kluczowe: emisja gazów cieplarnianych, cykl życia pojazdu, metoda LCA, stopy aluminium, wysokowytrzymała stal AHSS, redukcja masy

1. WSTĘP

W dzisiejszych czasach w przemyśle motoryzacyjnym dąży się do redukcji emisji gazów cieplarnianych poprzez obniżenie masy konstrukcji i elementów pojazdu. Osiąga się to poprzez stosowanie nowoczesnych materiałów inżynierskich o podwyższonych właściwościach wytrzymałościowych. Stopy aluminium są od dawna z powodzeniem wykorzystywanym materiałem w konstruowaniu pojazdów ze względu na ich niewielką masę, co jest bardzo istotne, opłacalne i pożądane. Charakteryzują się niską gęstością i umiarkowaną wytrzymałością. Stal z kolei jest materiałem stosowanym w motoryzacji od pokoleń i to nie bez powodu. Jest elastycznym materiałem, który jest w stanie dalej się rozwijać, aby dotrzymać kroku zmieniającym się wyzwaniom konstrukcji pojazdów. Nowa generacja stali AHSS ze względu na bardzo wysoką wytrzymałość, ale równocześnie dużą plastyczność jest konkurencją dla stopów aluminium przy dążeniu do redukcji masy samochodów.

Najskuteczniejszą metodą przy ocenie emisji gazów jest metoda LCA (Ocena Cyklu Życia) [1]. Pozwala ona na przeanalizowanie całego życia pojazdu od momentu pozyskania

materiału do produkcji, aż do końca życia - recyklingu. Tylko i wyłącznie analizując wszystkie etapy cyklu życia pojazdu jesteśmy w stanie określić zapotrzebowanie samochodów na energię i emisję gazów. W artykule dokonano takiej analizy na podstawie trzech samochodów osobowych o podobnej wielkości, wyposażeniu i układzie napędowym. Szczególny nacisk położono na szkielet strukturalny nadwozia samochodowego tzw. Body-in-White (BIW), oparty na trzech różnych materiałach: stalach miękkich, zaawansowanych stalach o wysokiej wytrzymałości AHSS oraz stopach aluminium.

2. STRUKTURA OCENY CYKLU ŻYCIA

Pierwszym etapem LCA jest określenie celu i zakresu badań. Dąży się do jednoznacznego określenia celu przeprowadzanej analizy cyklu życia, podania powodów prowadzenia badań oraz wskazania odbiorcy wyników. W drugiej fazie gromadzi się i bada dane wejść (np. materiały i energia) i wyjść (np. odpady). Analiza zbioru odnosi się do ilościowego zestawienia wpływów środowiskowych; odpowiada na pytanie „ile?”. Trzecim etapem jest ocena wpływu cyklu życia na środowisko, która polega na określeniu zależności środowiskowych wszystkich wejść i wyjść włączonych do badań LCA oraz oszacowania wielkości wpływu na środowisko. Dotyczy przedstawienia mechanizmów środowiskowych powodowanych oddziaływań; odpowiada na pytanie „jak?”. Faza ta składa się z wyboru kategorii wpływu, wskaźników kategorii i modeli charakteryzowania, klasyfikacji. Kategoriom wpływu dopisuje się wskaźniki, których wartości w indywidualnych klasach oddziaływania przedstawiają tzw. profil środowiskowy. Ostatnią fazą badań jest interpretacja. Głównym zadaniem interpretacji jest analizowanie rezultatów i sprawdzanie ich zawartości, zgodności i przydatności z punktu widzenia obranego celu i zakresu. W ostatnim etapie LCA następuje formułowanie wniosków, wyjaśnienie ograniczeń metody, a także zaproponowanie założeń, które będą prowadzić do redukcji skutków środowiskowych. Wyniki przedstawiane są w formie raportu. W oparciu o umieszczone w raporcie wyniki zatwierdzone są decyzje, których zadaniem jest minimalizacja negatywnego oddziaływania oraz rozwiązania technologiczne mające na celu naprawę poziomu ekologicznego wyrobu [1, 2].

3. PRZEDMIOT ANALIZY

Pomimo wzrostu znaczenia w przemyśle motoryzacyjnym takich materiałów jak stopy magnezu, stopy aluminium, tworzywa sztuczne i kompozyty, stale są nadal materiałem przeważającym w produkcji samochodów. Głównym celem, do którego się dąży jest coraz to mniejsza masa karoserii samochodów, a co za tym idzie zmniejszenie zużycia paliwa [3].

W artykule jako podstawę do analizy wykorzystano 3 materiały: stali miękkie, stopy aluminium oraz stali o wysokiej wytrzymałości AHSS, by na ich podstawie dokonać oceny redukcji gazów cieplarnianych. Redukcja masy jest tylko jedną z wielu strategii projektowych mających na celu redukcję gazów. Cel pracy jest więc wąski i podkreśla tylko jeden wybrany aspekt szerszego programu zmniejszenia emisji gazów w sektorze motoryzacji. Aby ocena była skuteczna wykorzystano LCA jako technikę sporządzania ilościowego zbioru wejść i wyjść.

Zastosowanie stopów aluminium to przede wszystkim sektor motoryzacji, głównie ze względu na obniżenie masy pojazdu i oszczędność energii. W tabelicy 1 przedstawiono atrakcyjność stopów aluminium ze względów konstrukcyjnych oraz ekologicznych [4].

Stale AHSS to nowa generacja stali wielofazowych, o bardzo wysokiej wytrzymałości. Na tle innych stali odznaczają się przede wszystkim bardzo wysoką wytrzymałością przy równoczesnym zachowaniu wysokiej plastyczności. Zalicza się do nich stale o różnych strukturach wielofazowych [6, 7]:

- ferrytyczno-bainitycznej z austenitem szczałkowym typu TRIP (Transformation Induced Plasticity); ulegają one umocnieniu podczas procesu kształtowania w wyniku przemiany martenzytycznej austenitu,
- ferrytyczno-martenzytycznej typu DP (Dual Phase),
- typu CP (Complex Phase) o złożonym udziale różnych faz,
- martenzytycznej typu MART (Martensitic Steel).

Tablica 1. Właściwości stopów aluminium (opracowanie własne na podstawie [4, 5])

Table 1. The properties of aluminum alloys (based on [4, 5])

Stopy aluminium	
Aspekt konstrukcyjny	Aspekt ekologiczny
Aluminium ($2,7 \text{ g/cm}^3$ w porównaniu z $7,9 \text{ g/cm}^3$ dla stali) jest materiałem plastycznym ale o przeciętnej wytrzymałości, porównywalnej z blisko 3-krotnie cięższym żeliwem, ale ok. 2-2,5 krotnie gorszej od stali o podwyższonej wytrzymałości.	Ekologiczność aluminium polega na możliwości jego recyklingu nieskończoną ilość razy. W przypadku aluminium używanego w produkcji samochodów do powtórnego wykorzystania powraca 85–90% metalu.
Stosowane jest jako główny składnik odlewniczych stopów lekkich z Si, Cu, Mg, Mn oraz z Mg i Mn do przeróbki plastycznej. Stopy te są droższe od stali, ale w sumarycznym rachunku wad i zalet są korzystne.	Bardzo ważne dla ochrony środowiska jest pozyskiwanie aluminium i jego stopów ze zbiórki złomu, gdyż koszt przetopienia aluminium przy jednoczesnej oszczędności energii wynosi tylko 5% kosztów produkcji metodą elektrolizy w hucie.
Łączna masa części wykonywanych ze stopów lekkich na bazie aluminium w nowoczesnym samochodzie to ok. 130 kg.	
Stosowanie tych stopów umożliwia zmniejszenie masy karoserii o ok. 30÷50%, przy zapewnieniu zbliżonych do stali właściwości konstrukcyjnych. Mają też dobrą energochłonność i odporność na korozję. Są jednak kosztowne i stosuje się je do droższych samochodów.	

Stale DQSK, IF to stale miękkie, niskowęglowe i plastyczne, których wytrzymałość na rozciąganie R_m wynosi poniżej 300 MPa, a wydłużenie całkowite A znajduje się w zakresie 30÷60%. Stale DQSK i IF są stalami o strukturze ferrytycznej, jednak IF nie zawierają w roztworze pierwiastków tworzących roztwory międzywęzłowe, w tym węgla ($C < 0,005\%$, $N < 0,005\%$, $S < 0,005\%$); cechują się wysoką podatnością na tłoczenie [8].

4. ANALIZA ZBIORU WEJŚĆ I WYJŚĆ

Dokonując analizy zbioru wejść i wyjść potrzebnej do określenia emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia pojazdu została dobrana jednostka funkcjonalna, która stanowi płaszczyznę odniesienia dla danych wejściowych i wyjściowych. Dzięki dokładnemu określeniu jednostki funkcjonalnej możliwe jest ilościowe zestawienie danych potrzebnych do obliczenia emisji gazów cieplarnianych. Podstawową jednostką funkcjonalną są trzy samochody osobowe o podobnej wielkości, wyposażeniu i układzie napędowym. Jednostka funkcjonalna FU (tablica 2) to trzy funkcjonalnie równoważne przepływy referencyjne RF^y , $y=b, a, u$, lecz z różnych szkieletów nadwozia [9]:

- RF^b : Szkielet nadwozia wykonany w całości ze stali miękkiej.
- RF^a : Szkielet nadwozia wykonany w całości ze stali AHSS.
- RF^u : Szkielet nadwozia wykonany w całości ze stopu aluminium.

W pracy trzy środki odniesienia scharakteryzowano przez ich zużycie paliwowe FE^y i siedmiowymiarowy wektor wielkości masy m_i^y (1) [9]:

$$RF^y = (m_1^y, m_2^y, m_3^y, m_4^y, m_5^y, m_6^y, m_7^y) \quad (1)$$

Tablica 2. Podstawowa jednostka funkcjonalna FU

Table 2. The functional unit FU

Jednostka funkcjonalna	
Jednostka napędowa	ICEV-G: benzyna/ bioetanol
Klasa samochodu	Samochód średniej wielkości

Pierwszym etapem na drodze obliczania emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia pojazdu jest określenie udziału poszczególnych wyrobów konstrukcyjnych w pojazdach o szkielecie nadwozia z trzech różnych materiałów, które odpowiadają sześciu głównym kategoriom materiałowym takim jak: płaskownik ze stali niestopowej ($i=1$), stali na wyroby długie ($i=2$), staliwa ($i=3$), aluminium walcowane ($i=4$), aluminium wytłaczane ($i=5$), odlew aluminiowy ($i=6$). Pozostała część masy została przypisana siódmej kategorii ($i=7$), która zawiera wszystkie pozostałe materiały, m.in. tworzywa sztuczne, miedź, szkło, gumę i inne materiały [9].

Dane wejściowe wyrobów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych w pojeździe o szkielecie nadwozia z trzech różnych materiałów: stali miękkiej, zaawansowanej stali o wysokiej wytrzymałości AHSS oraz stopu aluminium zostały przedstawione w tablicy 3.

Kolejnym etapem na drodze obliczenia emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia jest określenie zużycia paliwa pojazdów. Średnia oszczędność paliwa przepływu odniesienia RF^b (szkielet nadwozia ze stali miękkiej) jest oznaczona przez parametr FE^b (podane litr / 100km). Wartość zużycia paliwa nie tylko zależy od masy i konfiguracji układu napędowego pojazdu, ale także od rodzaju stosowanego paliwa i charakterystyki jazdy, które są zazwyczaj określone przez tzw. cykle jazdy [10].

Oszczędność paliwa odpowiadająca dwóm materiałom: stali AHSS oraz stopowi aluminium, RF^z , $z=a, u$, pochodzi z oszczędności paliwa bazowego poprzez odjęcie poprawy zużycia paliwa ΔFE^z generowane przez oszczędności masowe (2) [10]:

$$FE^z = FE^b - \Delta FE^z, \quad z=a, u \quad (2)$$

$$\Delta FE^z = FS \cdot \Delta VW^z, \quad z=a, u \quad (3)$$

gdzie: FS oznacza stosunek oszczędności paliwa do oszczędności masy (litr / 100km) na 100 kg.

Masa pojazdu o szkielecie nadwozia ze stali miękkich wynosi 1640 kg, ze stali AHSS 1523 kg, natomiast ze stopów aluminium 1486 kg. Sugerowana wartość dla układu napędowego dla samochodów o konstrukcji nadwozia z tych trzech materiałów wynosi 200000 km. Zapotrzebowanie na energię 192,92 MJ, natomiast wydajność ładowania akumulatora wynosi 90% [11]. Dane te stanowią podstawę do obliczenia zużycia paliwa na etapie użytkowania pojazdu.

W tabelicy 4 przedstawiono udział wyrobów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych dla poszczególnych materiałów oraz ich całkowitą masę. Dla stali miękkiej całkowita masa wyniosła najwięcej, 1640,4 kg. Na podstawie stali miękkiej została wyliczona oszczędność masowa dla zaawansowanej stali o wysokiej wytrzymałości AHSS oraz stopu aluminium.

Emisja gazów cieplarnianych w całym cyklu życia jest obliczana jako suma emisji GHG ze wszystkich etapów cyklu życia (4) [12]:

$$LCA^y = I^y_{wydobywanie} + I^y_{produkcja} + I^y_{używalność} + I^y_{zakończenie}, \quad y=b, a, u \quad (4)$$

$I^y_{wydobywanie}$ określa proces począwszy od wydobycia surowców i ich przerobu, $I^y_{produkcja}$ realizowany jest proces produkcji, $I^y_{używalność}$ stanowi całkowity użytek samochodu, $I^y_{zakończenie}$ określa wtórne wykorzystanie - recykling złomu. LCA^y nie stanowi obliczenia całkowitej ilości emisji gazów cieplarnianych, które można przypisać do cyklu życia pojazdu, lecz emisję gazów cieplarnianych związaną z produkcją i recyklingiem stali miękkiej i AHSS oraz stopu aluminium zastosowanych na szkielet nadwozia [12].

W tablicach 5-7 zostały zestawione dane wejściowe i wyjściowe materiałów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na poszczególnych etapach analizy cyklu życia. Pierwszy etap stanowi wydobywanie, które dzieli się na pierwotne oraz wtórne. Suma wydobywania pierwotnego i wtórnego stanowi daną wejściową na etapie produkcji. Udział w masie pojazdu stanowi różnicę pomiędzy masą wejściową, a wygenerowanym złomem na etapie produkcji. Ostatni etap to koniec życia, gdzie przedstawione są dane zebranego złomu oraz wtórnego materiału. Natomiast w tabelicy 8 zostały przedstawione dane wyjściowe recyklingu.

Tablica 3. Udział poszczególnych wyrobów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych w pojeździe o szkieletcie nadwozia ze stali miękkiej, stali AHSS oraz stopu aluminium (opracowanie własne na podstawie [11])

Table 3. The share of individual structural materials and consumables in a vehicle with the body-in-white of mild steel, AHSS steel and aluminum alloy (based on [11])

Materiały konstrukcyjne	Stal miękka		Stal AHSS		Stop aluminium	
	kg	% masy	kg	% masy	kg	% masy
Płaskownik ze stali niestopowej	620,5	40%	288,4	20%	285,8	20%
Stale na wyroby długie	232,7	15%	191,3	13%	189,6	14%
Żeliwo	155,1	10%	155,1	11%	155,1	11%
Stal nierdzewna	0,0	0%	0,0	0%	0,0	0%
Płaskownik AHSS	0,0	0%	243,0	17%	0,0	0%
Kształtowniki AHSS	0,0	0%	27,0	2%	0,0	0%
Odlew AHSS	0,0	0%	0,0	0%	0,0	0%
Aluminium walcowane	15,5	1%	12,8	1%	180,8	13%
Wytłaczane aluminium	15,5	1%	12,8	1%	84,3	6%
Odlew aluminiowy	77,6	5%	69,5	5%	66,9	5%
Walcowany magnez	0,0	0%	0,0	0%	0,0	0%
Odlew z magnezu	0,0	0%	0,0	0%	0,0	0%
SMC	0,0	0%	0,0	0%	0,0	0%
GFK	0,0	0%	0,0	0%	0,0	0%
CFRP	0,0	0%	0,0	0%	0,0	0%
Tworzywo sztuczne	186,1	12%	186,1	13%	186,1	13%
Guma	46,5	3%	46,5	3%	46,5	3%
Szkło	46,5	3%	46,5	3%	46,5	3%
Miedź	31,0	2%	31,0	2%	31,0	2%
Inny	124,1	8%	124,1	9%	124,1	9%

Materiały eksploatacyjne	
Baterie	0,0
Ogniwa paliwowe	0,0
Płyny	28,8
Opony	60,0

Tablica 4. Zestawienie udziału masowego materiałów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych (opracowanie własne na podstawie [11])

Table 4. Summary of mass fraction of structural materials and consumables (based on [11])

Udział materiałów konstrukcyjnych	Stal miękka		Stal AHSS		Stop aluminium	
	kg	%	kg	%	kg	%
		1551,2	100	1434,2	100	1396,8
Udział materiałów eksploatacyjnych	88,8		88,8		88,8	
Całkowita masa	1640,4	100	1523,0	100	1485,6	100
Całkowita masa oszczędności			117	7	154,4	9

Tablica 5. Dane wejściowe i wyjściowe materiałów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na poszczególnych etapach cyklu życia w pojeździe o szkieletie nadwozia ze stali miękkiej (opracowanie własne na podstawie [11])

Table 5. Input and output structural materials and consumables at different stages of the life cycle of the vehicle's body-in-white of mild steel (based on [11])

Stal miękka	Wydobycie		Produkcja		Udział w masie pojazdu, kg	Koniec życia	
	Pierwotne, kg	Wtórne, kg	Dane wejściowe, kg	Wygenerowany złom, kg		Zebrany złom, kg	Wtórny materiał, kg
Płaskownik ze stali niestopowej	1 071,74	56,41	1 128,15	507,67	620,48	589,83	560,34
Stale na wyroby długie	46,54	263,70	310,24	77,56	232,68	221,19	210,13
Żeliwo	0,00	193,90	193,90	38,78	155,12	147,46	140,08
Stal nierdzewna	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Płaskownik AHSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kształtownik AHSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Odlew AHSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Aluminium walcowane	29,83	0,00	29,83	14,32	15,51	13,54	12,19
Wyłaczane aluminium	19,39	0,00	19,39	3,88	15,51	13,54	12,19
Odlew aluminiumowy	14,54	82,41	96,95	19,39	77,56	67,71	60,94
Walcowany magnez	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Odlew z magnezu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SMC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GFK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CFRP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tworzywo sztuczne	372,29	0,00	372,29	186,14	186,14	0,00	0,00
Guma	93,07	0,00	93,07	46,54	46,54	0,00	0,00
Szkło	93,07	0,00	93,07	46,54	46,54	0,00	0,00
Miedź	62,05	0,00	62,05	31,02	31,02	0,00	0,00
Inny	124,10	0,00	124,10	0,00	124,10	0,00	0,00
Suma materiałów eksploatacyjnych	208,8		208,8		88,8		
Suma materiałów eksploatacyjnych i konstrukcyjnych	2135,4	596,4	2731,8	971,8	1640,0	1 053	995,9

Tablica 6. Dane wejściowe i wyjściowe materiałów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na poszczególnych etapach cyklu życia w pojeździe o szkieletie nadwozia ze stali AHSS (opracowanie własne na podstawie [11])

Table 6. Input and output structural materials and consumables at different stages of the life cycle of the vehicle's body-in-white of AHSS steel (based on [11])

Stal AHSS	Wydobycie		Produkcja		Udział w masie pojazdu, kg	Koniec życia	
	Pierwotne, kg	Wtórne, kg	Dane wejściowe, kg	Wygenerowany złom, kg		Zebrany złom, kg	Wtórny materiał, kg
Płaskownik ze stali niestopowej	498,11	26,22	524,33	235,95	288,38	274,13	260,43
Stale na wyroby długie	38,26	216,78	255,04	63,76	191,28	181,83	172,74
Żeliwo	0,00	193,90	193,90	38,78	155,12	147,46	140,08
Stal nierdzewna	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Płaskownik AHSS	419,73	22,09	441,82	198,82	243,00	231,00	219,45
Kształtownik AHSS	5,40	30,60	36,00	9,00	27,00	25,67	24,38
Odlew AHSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Aluminium walcowane	24,64	0,00	24,64	11,83	12,81	11,18	10,07
Wyłaczane aluminium	16,02	0,00	16,02	3,20	12,81	11,18	10,07
Odlew aluminiowy	13,02	73,80	86,83	17,37	69,46	60,64	54,57
Walcowany magnez	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Odlew z magnezu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SMC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GFK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CFRP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tworzywo sztuczne	372,29	0,00	372,29	186,14	186,14	0,00	0,00
Guma	93,07	0,00	93,07	46,54	46,54	0,00	0,00
Szkło	93,07	0,00	93,07	46,54	46,54	0,00	0,00
Miedź	62,05	0,00	62,05	31,02	31,02	0,00	0,00
Inny	124,10	0,00	124,10	0,00	124,10	0,00	0,00
Suma materiałów eksploatacyjnych	208,8		208,8		88,8		
Suma materiałów eksploatacyjnych i konstrukcyjnych	1968,5	563,4	2531,9	888,9	1523,0	943,1	891,8

Tablica 7. Dane wejściowe i wyjściowe materiałów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na poszczególnych etapach cyklu życia w pojeździe o szkieletie nadwozia ze stopu aluminium (opracowanie własne na podstawie [11])

Table 7. Input and output structural materials and consumables at different stages of the life cycle of the vehicle's body-in-white of aluminum alloy (based on [11])

Stop aluminium	Wydobycie		Produkcja		Udział w masie pojazdu, kg	Koniec życia	
	Pierwotne, kg	Wtórne, kg	Dane wejściowe, kg	Wygenerowany złom, kg		Zebrany złom, kg	Wtórny materiał, kg
Płaskownik ze stali niestopowej	493,63	25,98	519,61	233,83	285,79	271,67	258,09
Stale na wyroby długie	37,91	214,83	252,74	63,18	189,55	180,19	171,18
Żeliwo	0,00	193,90	193,90	38,78	155,12	147,46	140,08
Stal nierdzewna	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Płaskownik AHSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kształtownik AHSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Odlew AHSS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Aluminium walcowane	347,67	0,00	347,67	166,88	180,79	157,83	142,05
Wytłaczane aluminium	105,39	0,00	105,39	21,08	84,31	73,60	66,24
Odlew aluminiowy	12,54	71,05	83,59	16,72	66,87	58,38	52,54
Walcowany magnez	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Odlew z magnezu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SMC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GFK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CFRP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tworzywo sztuczne	372,29	0,00	372,29	186,14	186,14	0,00	0,00
Guma	93,07	0,00	93,07	46,54	46,54	0,00	0,00
Szkło	93,07	0,00	93,07	46,54	46,54	0,00	0,00
Miedź	62,05	0,00	62,05	31,02	31,02	0,00	0,00
Inny	124,10	0,00	124,10	0,00	124,10	0,00	0,00
Suma materiałów eksploatacyjnych	208,8		208,8		88,8		
Suma materiałów eksploatacyjnych i konstrukcyjnych	1950,5	505,8	2456,3	850,7	1485,6	889,1	830,2

Tablica 8. Dane wyjściowe dla pojazdów o szkielecie nadwozia ze stali miękkiej, stali AHSS, stopu aluminium (opracowanie własne na podstawie [11])

Table 8. Output data for vehicles with the body-in-white of mild steel, AHSS steel and aluminum alloy (based on [11])

	Współczynnik recyklingu, r^{car} , %	Wskaźnik odzysku złomu produkcyjnego, β_{prompt} , %	Wskaźnik odzysku złomu poeksploatacyjnego, β_{eol} , %
Płaskownik ze stali niestopowej	93,3	27,5	51,23
Stale na wyroby długie	92,0	-64,0	69,36
Żeliwo	91,6	-82,3	73,85
Stal nierdzewna	92,9	-65,0	57,70
Płaskownik AHSS	93,3	27,5	51,23
Kształtownik AHSS	92,0	-64,0	69,36
Odlew AHSS	91,6	-82,3	73,85
Aluminium walcowane	85,1	39,1	37,40
Wytłaczane aluminium	81,3	16,2	56,99
Odlew aluminiowy	81,3	-60,3	56,99
Walcowany magnez	79,1	3,2	67,99
Odlew z magnezu	84,6	36,7	39,52
SMC	0,0	0,0	0,00
GFK	0,0	0,0	0,00
CFRP	0,0	0,0	0,00
Tworzywo sztuczne	0,0	0,0	0,00
Guma	0,0	0,0	0,00
Szkło	0,0	0,0	0,00
Miedź	0,0	0,0	0,00

5. OCENA WPŁYWU CYKLU ŻYCIA NA ŚRODOWISKO

Dla każdego y przepływ odniesienia RF, $y = b, a, u$, wskaźnik emisji gazów cieplarnianych z produkcji materiałów i recyklingu jest liczony jako (5) [12]:

$$I_{mat}^y = \sum_{i=1}^6 \frac{m_i^y}{\gamma} I_i^{att} \quad y=b, a, u \quad (5)$$

gdzie: I_i^{att} oznacza emisję gazów cieplarnianych, którą można przypisać do jednego kg z kategorii materiału w produkcji pojazdu. Dla każdego rodzaju materiału, masa wymagana do produkcji pojazdów to dostarczony materiał podzielony przez wydajność produkcji m_i^y / γ_i , gdzie γ_i oznacza wydajność produkcyjną materiału i.

Emisję gazów cieplarnianych przypisaną dla każdego rodzaju materiału oblicza się w następujący sposób (6) [12]:

$$I_i^{att} = (1 - r_i^{cont}) \cdot I_i^p + r_i^{cont} \cdot I_i^p + I_i^f - \alpha \left(\frac{s_i^{out} - s_i^{in}}{s_i^s - s_i^p} \right) (I_i^p - I_i^s) \quad (6)$$

gdy $\alpha=0$ równanie upraszcza się do postaci (7):

$$I_i^{att} = (1 - r_i^{cont}) \cdot I_i^p + r_i^{cont} \cdot I_i^p + I_i^f \quad (7)$$

Maksymalna ilość podstawowej produkcji, którą określa maksymalny recykling przechodzi przez wszystkie zewnętrzne przepływy złomu. Niezbędne parametry do obliczenia emisji gazów cieplarnianych [10, 12]:

I_i^p – ruda/ złom przeznaczone do produkcji pierwotnej wlewków 1 kg materiału,

I_i^s – złom przeznaczony do wtórnej produkcji wlewków 1 kg materiału,

I_i^f – gotowy wyrób, dalsze przetwarzanie 1 kg materiału,

r_i^{cont} – procent dostarczonego materiału pochodzącego z produkcji pierwotnej,

s_i^s – kg złomu wejścia na kg wlewka z produkcji wtórnej,

s_i^{in} – ilość wejścia złomu w cyklu życia pojazdu,

s_i^{out} – ilość złomu pozyskanego – wyjście złomu,

α – ilość złomu przeznaczona na cykl życia pojazdu.

Złom wpływa na cały cykl życia pojazdu, a w połączeniu ze stopą recyklingu możliwe jest obliczenie eksploatacji złomu (8) [10]:

$$\begin{aligned} s_i^{in} &= s_i^p(1 - r_i^{cont}) + s_i^s \cdot r_i^{cont} \\ s_i^{out} &= ce_i^m \cdot se_i^m(1 - \gamma_i) + ce_i^{eol} \cdot se_i^{eol} \cdot \gamma_i \\ r^{car} &= ce_i^m \cdot se_i^m \cdot ry_i^m(1 - \gamma_i) + ce_i^{eol} \cdot se_i^{eol} \cdot ry_i^{eol} \cdot \gamma_i \end{aligned} \quad (8)$$

Dodatkowe parametry to:

ce_i^m – wydajność gromadzenia złomu podczas produkcji 1 kg materiału,

se_i^m – wydajność rozdzielania złomu podczas produkcji 1 kg materiału,

ry_i^m – wydajność recyklingu produkcji 1 kg materiału,

ce_i^{eol} – wydajność gromadzenia złomu z recyklingu 1 kg materiału,

se_i^{eol} – wydajność rozdzielania złomu z recyklingu 1 kg materiału,

ry_i^{eol} – wydajność recyklingu 1 kg materiału,

γ_i – wydajność produkcji 1 kg materiału.

Poziom recyklingu złomu definiowany jest jako materiał wtórny z całej produkcji. Wejście złomu do produkcji wtórnej jest obliczane ze wzoru: $s_i^S = \frac{s_i^{out}}{r_i^{cont}}$. Wszystkie przepływy złomu obliczane są na podstawie równania (9) [10]:

$$s_i^{out} + s_i^p \beta = s_s^{in} + s_i^s \beta \rightarrow \beta = \frac{s_i^{out} - s_i^{in}}{s_i^s - s_i^p} \quad (9)$$

gdzie: $\beta = r_i^{car} - r_i^{cont}$

Czynnikiem, który ma największy wpływ na środowisko jest globalne ocieplenie z różnych faz cyklu życia oraz gazy cieplarniane. Najważniejszym i kluczowym celem pracy jest obliczenie emisji gazów cieplarnianych pomiędzy trzema różnymi materiałami. Globalne ocieplenie z produkcji materiałów i recyklingu dla wszystkich trzech materiałów użytych na szkielet nadwozia wynosi (10) [10]:

$$GWP_{mat}^y = \sum_{i=1}^7 \frac{m_i^y}{\gamma_i} \cdot GWP_i^{att} \quad (10)$$

Globalne ocieplenie z fazy użytkowej dla wszystkich trzech materiałów (11):

$$GWP_{use}^y = FE^y \cdot GWP_{fuel} \cdot TM \quad (11)$$

Globalne ocieplenie systemu produktu dla wszystkich trzech materiałów (12):

$$GWP^y = GWP_{mat}^y + GWP_{use}^y \quad (12)$$

Różnice emisji gazów cieplarnianych pomiędzy trzema materiałami (13) [10]:

- Stal miękka i stal AHSS: $\Delta GWP^{b-a} = GWP^b - GWP^a$
- Stal miękka i stop aluminium: $\Delta GWP^{b-u} = GWP^b - GWP^u$
- Stop aluminium i stal AHSS: $\Delta GWP^{u-a} = GWP^u - GWP^a$

(13)

W tabelicy 9 zostały przedstawione otrzymane wyniki dotyczące emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia pojazdu dla trzech różnych materiałów: stali miękkiej, stali AHSS oraz stopu aluminium, a także dokonano porównania pomiędzy tymi materiałami. Otrzymane wyniki przedstawiają jak poszczególne etapy cyklu życia pojazdu wpływają na środowisko.

Tablica 9. Emisja gazów cieplarnianych (CO₂ w kg)Table 9. Greenhouse gas emissions (CO₂ in kg)

	Etapy oceny cyklu życia pojazdu			
	Produkcja, kg	Użytkowanie, kg	Koniec życia- recykling, kg	Wynik końcowy, kg
Stal miękka	8 595	40 856	-2 138	47 313
Stal AHSS	8 096	40 229	-1 902	46 423
Stop aluminium	10 470	40 028	-3 194	47 304
Stal miękka-Stal AHSS	499	627	-236	890
Stal miękka-Stop aluminium	-1 875	828	1 056	9
Stal AHSS-Stop aluminium	-2 374	201	1 292	-881

W tablicy 10 zostały przedstawione otrzymane wyniki dotyczące zapotrzebowania na energię dla wszystkich trzech materiałów użytych na szkielet nadwozia oraz dokonano porównania pomiędzy tymi materiałami.

Tablica 10. Całkowite zapotrzebowanie na energię (w MJ)

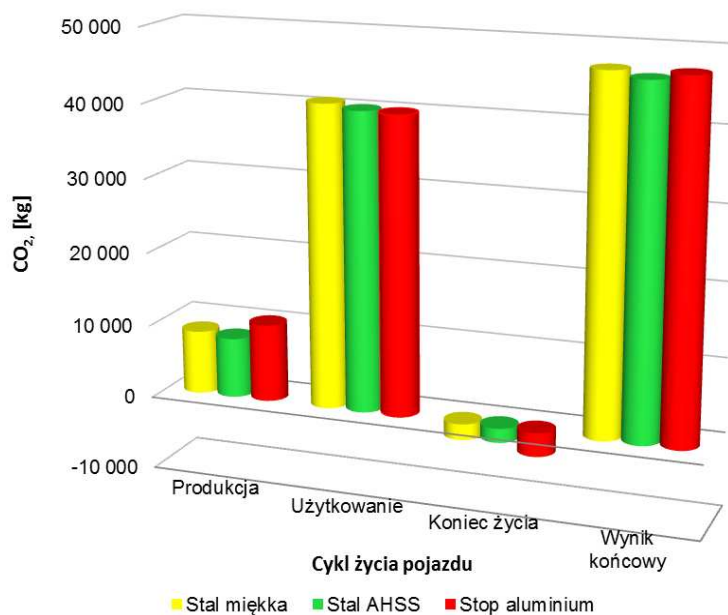
Table 10. Total energy demand (in MJ)

	Etapy oceny cyklu życia pojazdu			
	Produkcja, kg	Użytkowanie, kg	Koniec życia- recykling, kg	Wynik końcowy, kg
Stal miękka	124 716	550 095	-22 219	652 593
Stal AHSS	118 513	541 655	-19 718	640 450
Stop aluminium	155 401	538 954	-38 343	656 011
Stal miękka-Stal AHSS	6 203	8 440	-2 501	12 143
Stal miękka-Stop aluminium	-30 685	11 141	16 125	-3 419
Stal AHSS-Stop aluminium	-36 888	2 701	18 625	-15 562

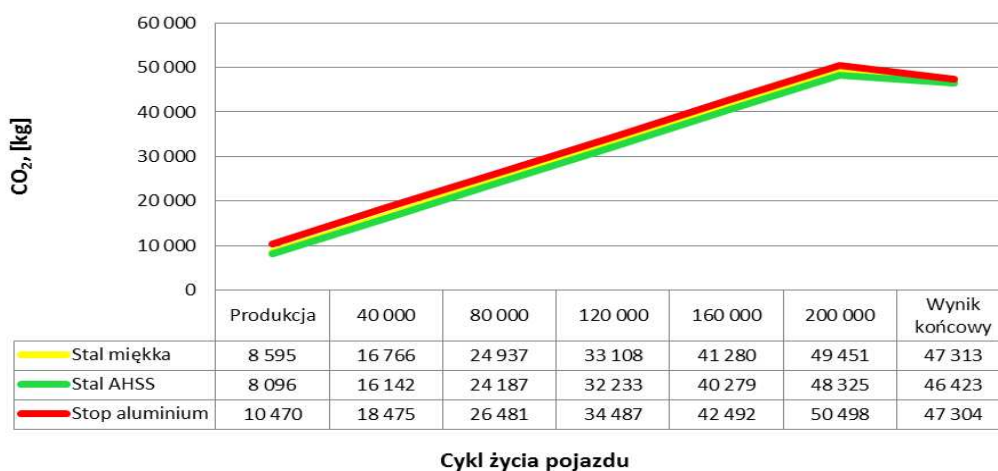
Z powyższej analizy jednoznacznie wynika, że z punktu widzenia ekologii, najlepszym materiałem na konstrukcję nadwozia samochodu są stale nowej generacji AHSS. Sumaryczna emisja gazów cieplarnianych w całym cyklu życia samochodu o konstrukcji ze stali AHSS jest najmniejsza i wynosi 46423 kg (rys. 1, 2). Jej produkcja jest najmniej energochłonna, a co za tym idzie podczas tego procesu do atmosfery wydzielana jest najmniejsza ilość gazów cieplarnianych.

W trakcie użytkowania nieznacznie mniejsza emisja występuje w samochodzie ze stopów aluminium i jest to związane z mniejszą masą samochodu w stosunku do samochodu o konstrukcji ze stali AHSS, przy zachowaniu tej samej wytrzymałości konstrukcji. Niestety z powodu bardzo energochłonnego procesu produkcji stopów aluminium, który wynosi 155401 MJ (rys. 3, 4), ogólny bilans jest ujemny, ponieważ korzyści związane z mniejszą masą karoserii (całkowita masa wynosi 1485,6 i jest to 2,5% oszczędności masowej w porównaniu ze stalą AHSS) są zdecydowanie mniejsze niż szkody w atmosferze poniesione z związku z produkcją tego materiału.

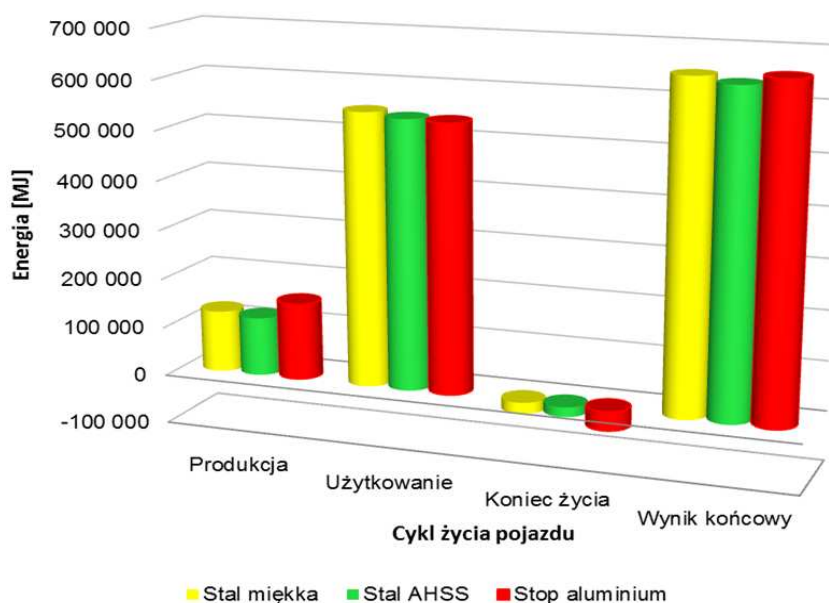
Samochody o konstrukcji ze stali AHSS charakteryzują się o 1,88% (890 kg CO₂) mniejszą emisją gazów cieplarnianych w stosunku do samochodów o konstrukcji ze stali miękkiej oraz o 1,86% (881 kg CO₂) mniejszą emisją w porównaniu do konstrukcji ze stopów aluminium. Jak widać dla środowiska różnica pomiędzy samochodem o konstrukcji nadwozia ze stali miękkiej, a samochodem o konstrukcji nadwozia ze stopów aluminium jest praktycznie pomijalnie mała i wynosi 9 kg emisji CO₂, co przy całościowej emisji gazów powodowanej przez samochód mieści się w granicy błędów obliczeń. Na rys. 1 i 3 przedstawione są otrzymane wyniki w postaci diagramów natomiast na rys. 2 i 4 w postaci krzywych, ze szczególnym uwzględnieniem etapu użytkowania, który dla całego cyklu życia pojazdu wynosi 200000 km.



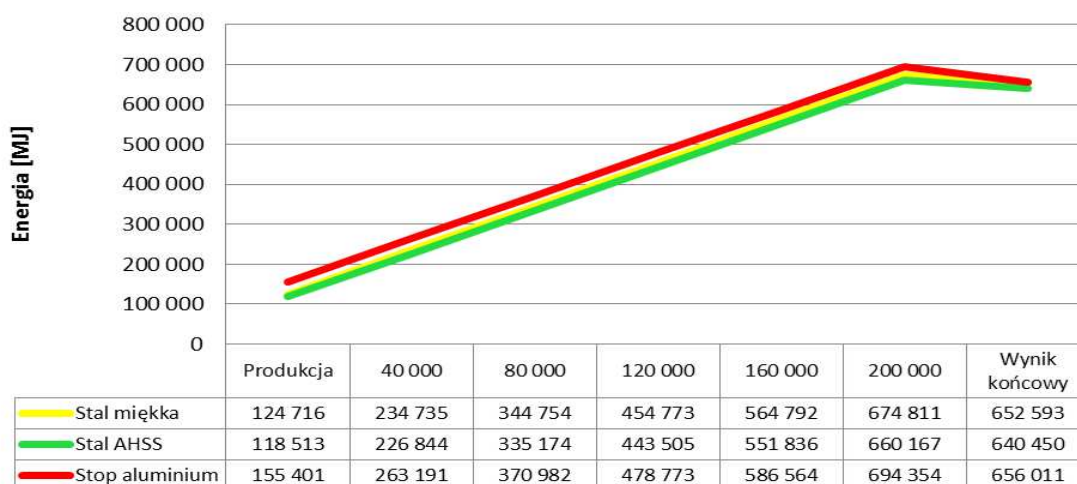
Rysunek 1. Emisja gazów cieplarnianych na wszystkich etapach cyklu życia pojazdu
 Figure 1. Greenhouse gas emissions at all stages of the life cycle of the vehicle



Rysunek 2. Emisja gazów cieplarnianych ze szczególnym uwzględnieniem etapu użytkowania
 Figure 2. Greenhouse gas emissions with particular attention to the stage of use



Rysunek 3. Całkowite zapotrzebowanie na energię na wszystkich etapach cyklu życia pojazdu
 Figure 3. Total energy demand at all stages of the life cycle of the vehicle



Rysunek 4. Całkowite zapotrzebowanie na energię ze szczególnym uwzględnieniem etapu użytkowania
 Figure 4. Total energy demand with particular attention on the stage of use

6. WNIOSKI

1. Metoda LCA jako jedyna z metod zarządzania środowiskiem pozwala ocenić efekty jakie dany wyrób wywiera na środowisko podczas całego życia. Dokonując analizy zbioru wejść i wyjść można obliczyć emisję gazów cieplarnianych na poszczególnych etapach cyklu życia pojazdu oraz całkowite zapotrzebowanie na energię.

2. Poziom emisji gazów dla konstrukcji nadwozia ze stali miękkiej oraz stopów aluminium jest na podobnym poziomie, natomiast ze stali AHSS znacząco się różni. Sposób w jaki konstrukcje nadwozia ze stopów aluminium i stali AHSS osiągnęły obniżki emisji gazów jest zupełnie inny. Dla stali AHSS najmniejsza emisja gazów cieplarnianych została osiągnięta na etapie produkcji i wyniosła 8096 kg CO₂ oraz dla całego cyklu życia 46423 kg CO₂. Natomiast stopy aluminium na etapie użytkowania osiągnęły najmniejszą emisję gazów 40028 kg CO₂ i jest to o 201 kg CO₂ mniej w porównaniu ze stalami AHSS. Jednak ta przewaga stopów aluminium w fazie użytkowania nie rekompensuje zwiększonej emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia pojazdu.
3. Interpretacja otrzymanych wyników ułatwia i pozwala na podejmowanie zmian w projektowaniu pojazdów oraz pomaga wybrać odpowiednie rozwiązania w celu udoskonalenia konstrukcji pojazdów i zminimalizowania wpływu wyrobów na środowisko. Z punktu widzenia środowiska, stale AHSS okazują się być istotnym kierunkiem rozwoju konstrukcji pojazdów w zastosowaniach motoryzacyjnych.

LITERATURA

1. W. Adamczyk, Ekologia wyrobów, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 2004.
2. J. Górczyński, Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów, WNT, 2007.
3. M. Idzior: Kierunki zmian materiałowych w motoryzacji w świetle wymogów ekologii, Motrol (2007) 72-87.
4. Strona internetowa: <http://www.tms.org/pubs/journals/jom/indexes/aluminum.html>
5. Strona internetowa: <http://www.world-aluminium.org/>
6. Z. Gronostajski, R. Kuziak, Metalurgiczne, technologiczne i funkcjonalne podstawy zaawansowanych wysokowytrzymałych stali dla przemysłu motoryzacyjnego, Prace IMŻ, 1 (2010) 22-26.
7. A. Grajcar, Struktura stali C-Mn-Si-Al kształtowana z udziałem przemiany martenzytycznej indukowanej odkształceniem plastycznym, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009.
8. Strona internetowa: http://wiki.answers.com/Q/What_is_mild_steel
9. S. Das, The life-cycle impacts of aluminum body-in-white automotive material, JOM 52/8 (2000) 41-44.
10. R. Geyer, Life cycle greenhouse gas emission assessments of automotive materials, Methodology Report, 2007, 1-50.
11. Strona internetowa: <http://www.worldautosteel.org/projects/vehicle-lca-study/auto-materials-ghg-comparison-model/>
12. L. Cheah, J. Heywood, R. Kirchain, The energy impact of U.S. passenger vehicle fuel economy standards, Massachusetts Institute of Technology, USA.